壁石と中詰材の関係に着目した石橋模型の崩壊挙動の実験検討

熊本大学大学院 ﾌｪﾛｰ会員○山尾 敏孝，熊本高専 正会員 岩坪 要
瀧上工業㈱ 正会員 蓬原 拓朗，熊本大学大学院 学生員 上田 智也

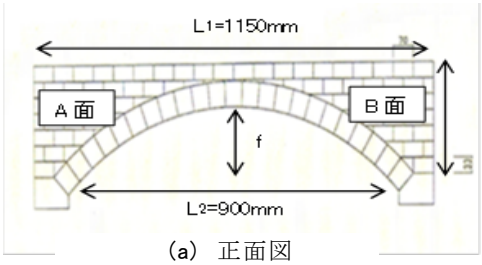
1. はじめに

2016年4月14日と16日の深夜に発生した2回の直下型の熊本地震により，熊本城の石垣や石橋の壁石あるいは古墳の石積ドーム等の石積構造に大きな被害が発生した．石積構造であっても使用石材の形状や大きさ，積み勾配，裏込め材（中詰材）等により被災状況も差異があったようである．本研究では,壁石の孕みだし，壁石崩壊や緩み，高欄崩壊や破壊などが発生した石橋に着目し，地震による石橋の壁石被害について原因の解明と崩壊挙動の検討を試みたものである．壁石形状と中詰材との関係を明らかにするため，壁石を有する石橋模型を用いて正弦波による振動試験を行った．模型に使用する壁石の形状と中詰材の種類を変化させた模型を用いて，正弦振動に対する崩壊に至るまでの挙動の評価及び崩壊に至る要因について検討した．

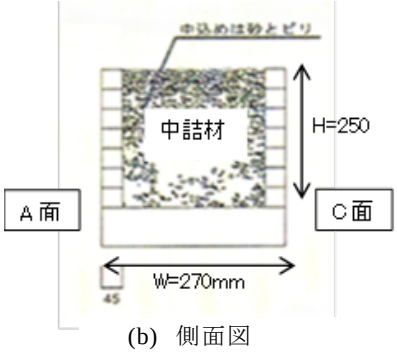
2. 石橋模型の振動実験概要

実験に使用した石橋模型は，アーチ輪石が文献2)の模型実験で使用した，支間長900mm，幅員270mm（スパンライズ比0.2）のものと同じであり，写真-1及び図-1に示すような中詰材を入れた壁石で積み上げたものである．本実験では，地震時の壁石挙動を把握するための基礎実験として，正弦波振動をさせた時の崩壊に至るまでの壁石挙動を調べた．この壁石崩壊には，壁石の形状と中詰材が影響すると推測されたので，壁石の形状として，直方体(大，小)と四角錘の3種類を用い，中詰材は表-1に示すような砂，砂利，黒ぼく土，砂と砂利の混合した4種類を使用し，壁石の崩壊に及ぼす影響を調べた．また，実石橋では長年にわたり自重等により壁石に圧力(拘束圧)が作用していると考えられることから，これを考慮するために壁石の上部の両端から拘束棒で拘束した場合としない場合を比較した(写真-2)．振動台に模型を設置した後，加速度0.2Gとして,3～15Hzの正弦波を橋軸方向に加振した場合と橋軸直角方向に加振した場合について壁石の崩壊に至るまで挙動を比較検討した．

写真-1 石橋模型と拘束位置



(a) 正面図



(b) 側面図

図-1 石橋模型寸法

3. 実験結果

アーチ輪石のみの振動実験及び壁石模型で4種類の中詰材を用いた振動実験の結果を表-2にまとめて示した．なお，壁石模型の場合すべて直方体形状の壁石を使用した．表には拘束の有無のケースと実験で発生した主な挙動等について記述した．写真-3(a)は，アーチ輪石のみに橋軸方向の加振をした時の挙動を示しているが，4～5Hzの振動数で輪石に大きな開きが発生していることがわかる．なお，アーチ輪石は崩壊に至らなかった．写真-3(b)から写真-3(d)は，中詰材として砂利を用いた石橋模型の崩壊に至るまでの挙動特性を示したものである．橋軸方向に加振した場合，

表-1 模型に使用した中詰材

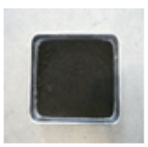
中詰材	砂	砂利	黒ぼく土	砂と砂利の混合
材料の様子				
粒径(mm)	0.06～2	13～20	0.074以下	0.06～20
単位体積重量 (kN/m^3)	13.35	16.86	10.38	16.92
含水率(%)	9.7	0.35	21.9	4.9

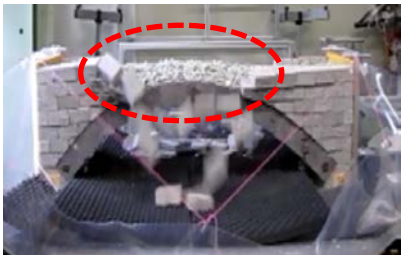
写真-2 拘束棒

キーワード　壁石，石橋模型，中詰材，振動実験，崩壊挙動，熊本地震
連絡先　〒860-8555　熊本市中央区黒髪2丁目39-1　TEL 096-342-3533

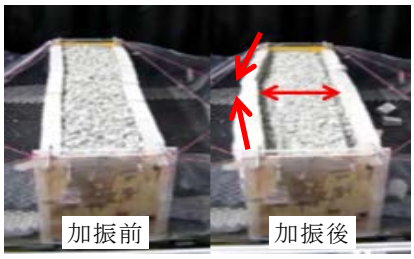
表-2　振動実験の結果のまとめ

中詰材	加振方向	拘束	卓越固有周期(Hz)	主な発生挙動
無(アーチ輪石のみ)	橋軸(X)		4.1～4.5	輪石全体が橋軸方向に波打つように振動
	橋軸直角(Y)		4.6～5.3	橋軸直角方向に一体となって振動し，崩壊
砂	橋軸(X)	無	7.6～8.0	壁石の孕み(大)，抜け落ち
		有	6.8～7.6	壁石の孕み(小)，抜け落ち
	橋軸直角(Y)	無	17～18	一部壁石の崩壊
		有	16～17	壁石の抜け落ち，孕み(小)
砂利	橋軸(X)	無	5.9～6.5	壁石の崩壊
		有	6.3～7.2	壁石の抜け落ち，孕み(大)
	橋軸直角(Y)	無	8.0～9.0	壁石の崩壊
		有	9.0～10.0	壁石の孕み(大)
黒ぼく土	橋軸(X)	無	7.0～7.2	壁石の崩壊，中詰の流出
		有	7.8～8.0	壁石の孕み(小)
	橋軸直角(Y)	無	12～12.6	一部壁石の崩壊
		有	9.5～10	壁石の孕み(大)
砂と砂利の混合	橋軸(X)	無	8.7～9.6	壁石の孕み(小)，抜け落ち
		有	7.5～8.1	壁石の孕み(微小)
	橋軸直角(Y)	無	11～13	上部壁石の一部落下
		有	9.6～10.8	壁石の孕み(小)

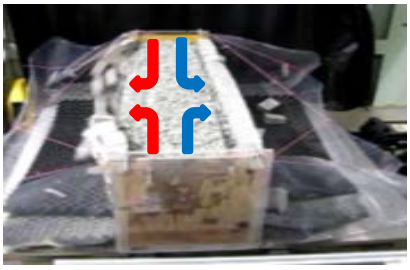
(a)アーチ輪石の挙動



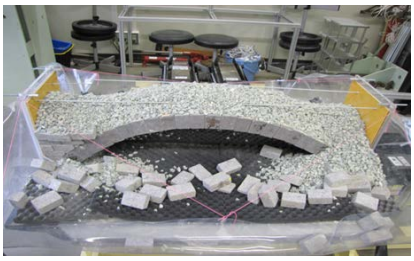
(b)アーチ上部の壁石の倒壊



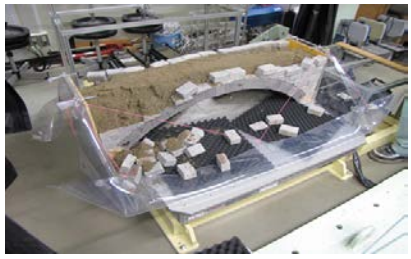
(c)壁石の開き(孕みだし)



(d)中詰材の挙動



(e)中詰材の流出



(f)中詰材の締め固まり

写真-3　壁石崩壊のメカニズム

石橋模型は橋軸方向に波打つように振動し，壁石はアーチ輪石のクラウン部に接触する壁石から孕みだしが生じ崩壊に至った(**写真-3(b)**)．一方，橋軸直角方向に加振した場合，石橋模型全体が小刻みに振動し，上部の壁石が徐々に孕みだし壁石が外側に開く様子が観察され，**写真-4(c)**には，加振前後の様子を比較して示した．この場合，振動により壁石が中詰材により押し出され崩壊に至る様子が観察され(**写真-4(d)**)，更に加振を続けると，**写真-4(e)**に見られるように，中詰材が流出し壁石を巻き込みながらほぼ全域の壁石が崩壊に至った．特に，中詰材として砂利を使用した場合，砂や黒ぼく土と比較しても壁石の崩壊に与える影響が大きかった．中詰材として砂と砂利を半々に混合した場合，壁石の崩壊挙動が最も小さくなった．この要因としては，表-1 に使用した中詰材の単位体積重量と含水率を示しているが，砂と水の混合剤は，他の中詰材と比較すると重量が大きく，振動により材料地震の分離がほとんど発生しないため，アーチ輪石への適度な圧縮効果が得られるため，壁石内の移動が小さく壁石②与える影響が小さくなったものと考えられる．また，**写真-4(f)**に示すように，壁石が崩壊した際，粒径の大きい砂利と比べ中詰材が締め固まっており，壁石を巻き込んでの流出が小さいため壁石の崩壊も抑えられたと考えられる．

参考文献

1)堀田昴良：熊本地震による石橋被害調査と模型実験による壁石崩壊メカニズムの検討，平成28年度卒業論文，2017
2) 小倉孟：長大スパンを想定した石アーチ模型の動 的挙動特性の検討
3)山尾敏孝，山本健次郎，小石剛之，工藤輝彦：損傷を有する石造アーチ橋の力学的挙動特性の検討，構造工学論文集，Vol.55A，pp.23-33，2009.